第十章　恆星演化

10.1 主序星

- **原恆星** (protostar) **核心溫度升高，引發核聚變，產生能量，溫度急促上升，從赫羅圖的右方左移，進入主星序** (main sequence)
- **主星序右下端以外的原恆星的質量太低** (**低於** 0.08 **太陽質量**)**，核心的溫度和密度太低，不足以引發核聚變，不能進入主星序，成為真正的恆星**
  - **這些天體變成棕矮星** (brown dwarf)**，發放紅外線輻射，但光度極低，且緩慢地冷卻下來**
- **主星序左上端以外的星雲質量太高** (**大於** 100 **太陽質量**)**，收縮時變得不穩定，並且分裂成很多質量小的碎片，各自形成恆星**
- **因此主序星的質量介乎** 0.08 **太陽質量至** 100 **太陽質量之間**
- **主序星** (main-sequence star)
  - **恆星核心「燃燒氫氣」的階段，恆星不斷產生能量，氣體熱壓力抵消萬有引力，恆星達到平衡狀態**
  - **恆星停留在這階段的時間佔其壽命** 90%**，因此大約** 90% **的恆星屬於主序星**
- **主序星的質量—光度關係** (mass-luminosity relation)**：質量越大的主序星越光亮**
  - **質量越大的主序星，萬有引力越強，核心的密度和溫度越高，核聚變越快，產生能量越多，因此光度越高**
  - **質量大的主序星無論在體積、溫度、或光度方面也很高**
- **質量越大的恆星壽命越短**
  - **恆星質量越大，萬有引力越強，核心溫度較高。**
  - **由於核聚變的速度對溫度極為敏感，因此高溫恆星消耗氫燃料的速度極快，壽命很短**
  - **例如：一顆** 3.5 **太陽質量的恆星約可停留在主序星階段四億四千萬年，太陽可以維持約** 100 **億年，而質量非常低的恆星** (**稱為紅矮星，**red dwarf) **可以維持** 2-3 **千億年**
  - **由於低質量的恆星壽命長，所以宇宙中較多低質量恆星**

光譜型	質量 (太陽質量)	光度 (太陽光度)	在主星序上逗留的 時間 (年)
O5	40	405,000	1×10^{6}
B0	15	13,000	11×10^{6}
A0	3.5	80	440×10^{6}
F0	1.7	6.4	3×10^{9}
G0	1.1	1.4	8×10^{9}
K0	0.8	0.46	17×10^{9}
M0	0.5	0.08	56×10^{9}

圖 10-1 上表顯示了一些典型主序星的特性。注意恆星的質量越大，其光度和溫度越高，但核心的氫燃料會很快地耗盡，所以它們停留在主星序的時間很短。

10.2 脫離主星序後之演化

- 膨脹成為紅巨星 (red giant)：
  - 長時期燃燒氫 (hydrogen) 燃料之後，恆星的核心堆滿被氫層圍繞的灰燼 – 氦 (helium)
  - 核心製造能量的速度減慢，熱壓力不足以抗衡重力
  - 核心收縮，釋放熱能，核心的溫度上升，加熱包圍核心的氫氣外層，緊貼核心外層的氫，引發核聚變，並向外燃燒
  - 能量向外擴散，外層急劇膨脹冷卻，形成非常巨大，但外層溫度低，密度極低的紅巨星
  - 紅巨星表面積很大，因此非常光亮。例如金牛座的畢宿五，獵戶座內的參宿四
- 恆星移向赫羅圖的右方 (表面溫度較低) 和上方 (較光亮)。

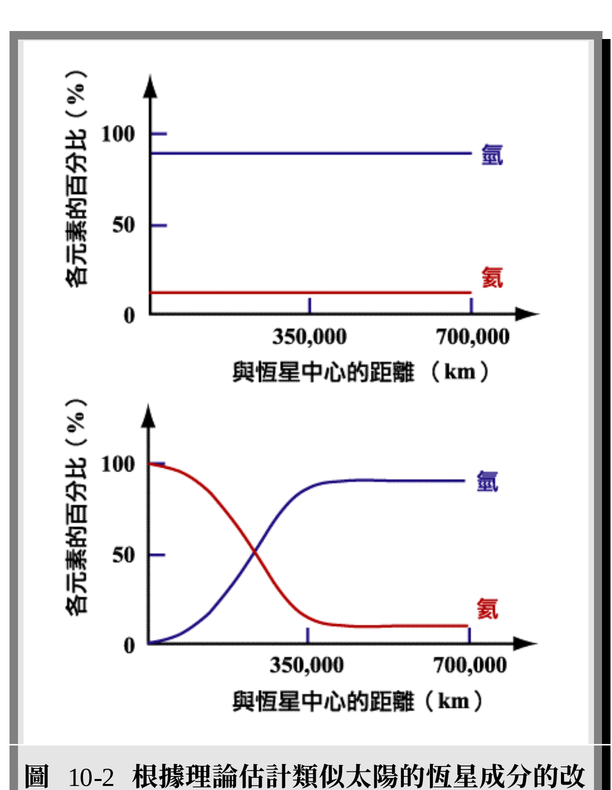


圖 10-2 根據理論估計類似太陽的恆星成分的改變。(上) 恆星誕生時氫與氦的相對含量；(下) 100 億年後的相對含量，注意這時恆星的核心幾乎完全被氦灰燼堆滿。

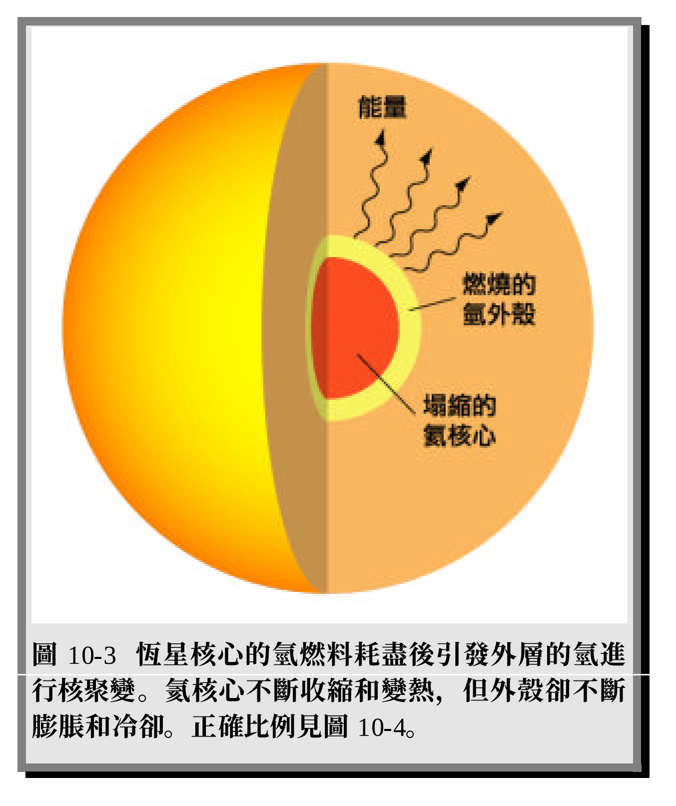


圖 10-3 恆星核心的氫燃料耗盡後引發外層的氫進行核聚變。氦核心不斷收縮和變熱，但外殼卻不斷膨脹和冷卻。正確比例見圖 10-4。

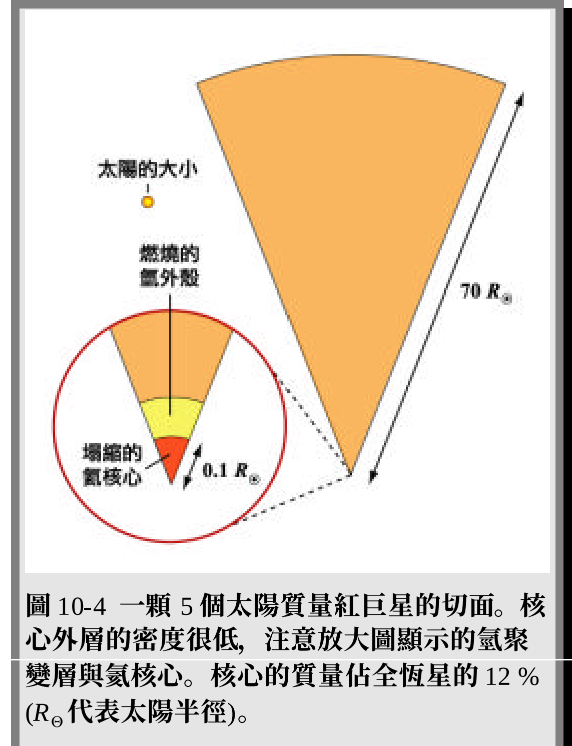


圖 10-4 一顆 5 個太陽質量紅巨星的切面。核心外層的密度很低，注意放大圖顯示的氫聚變層與氦核心。核心的質量佔全恆星的 12 % ($R_{\odot}$ 代表太陽半徑)。

- 恆星的核心不繼累積氦，氦核心的質量增加。核心不斷在萬有引力作用下收縮，溫度不斷上升
- 當溫度達到一億度，氦原子核開始發生核聚變，三顆氦原子核聚合成為一顆碳 (carbon) 原子核，產生的能量大幅增加，核心膨脹，外層變得較熱，恆星返回赫羅圖左方 (較熱)

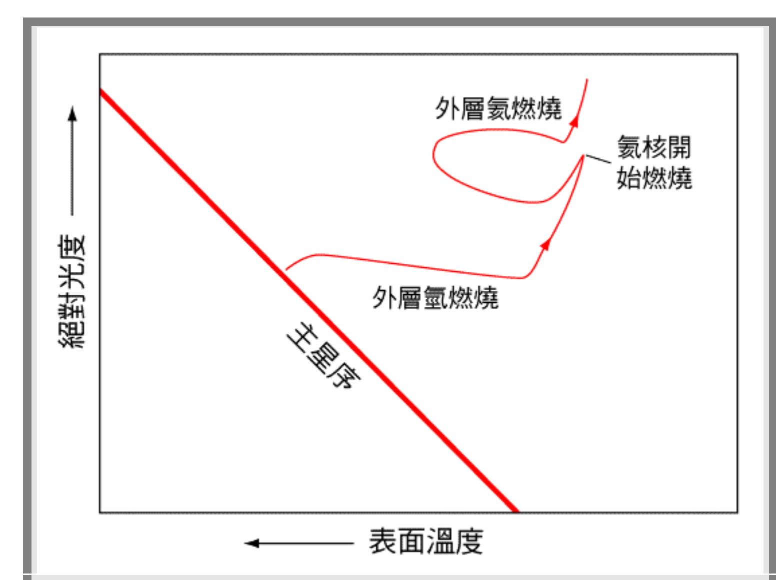
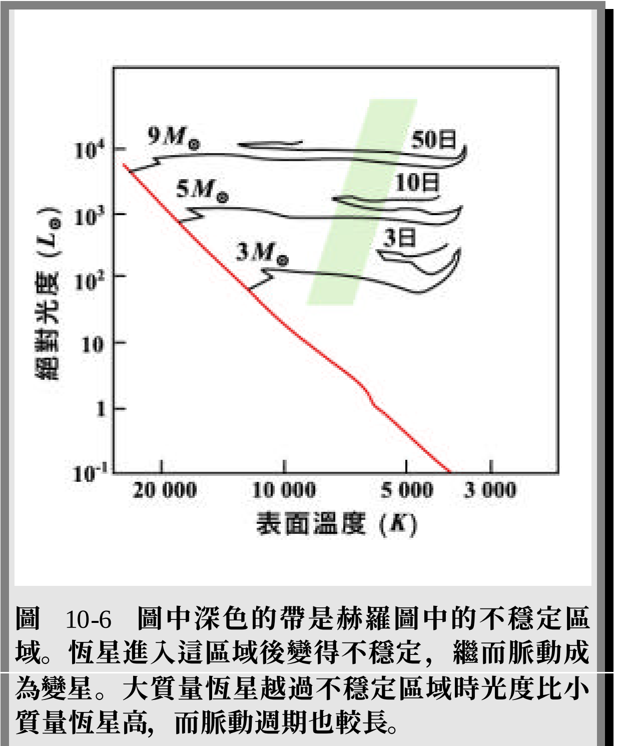


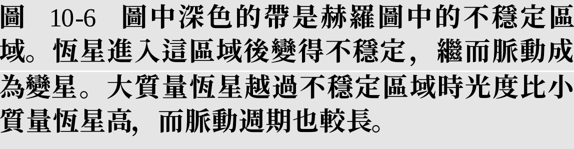
圖 10-5 恆星在離開主星序後在赫羅圖上的演化路徑。圖左下的帶狀區域是主星序。當恆星核心的氫耗盡後，外層的氫燃燒，恆星迅速經過巨星帶。當核心溫度足夠高時，核心的氦開始聚合，繼而是外層的氦。

- 質量很大的恆星經過一連串的核聚變，製造越來越重的元素，直至鐵 (iron)。
  - 這個過程稱為核合成 (nucleosynthesis)，是宇宙間重元素的來源
  - 大質量恆星環繞巨星帶在赫羅圖左右來回許多次
- 太陽質量小，變成紅巨星後最多只可產生碳和氧等元素。

10.3 變星

- **巨星在赫羅圖中左右移動時可能進入「不穩定區域」**(instability strip)。**此時恆星外層振動，形成變星。**
- **變星的亮度和大小都會週期性地改變**
- **造父變星** (Cepheid) **是一種週期性變星，數日內半徑改變** 5-10 %，**亮度改變** 0.1-2 **星等。**
  - **例如北極星的變光週期約** 4 **日，亮度改變** 0.1 **星等。**
- **造父變星的週期–光度關係** (Period-luminosity relation)**：**
  - **質量較大的造父變星體積較大、較光亮**
  - **但由於質量較大，所以振動較慢。因此較光亮造父恆星的脈動週期較長**
- **我們可以根據週光關係推斷造父變星的距離。**
  - **量度造父變星的週期，運用週光圖推斷造父變星的絕對星等** (**真實亮度**)，**再比較真實星等與視星等** (**在地球上觀測的亮度**)，**推斷它的距離**
  - **這是一種量度星系距離的重要方法**




圖 10-6 圖中深色的帶是赫羅圖中的不穩定區域。恆星進入這區域後變得不穩定，繼而脈動成為變星。大質量恆星越過不穩定區域時光度比小質量恆星高，而脈動週期也較長。

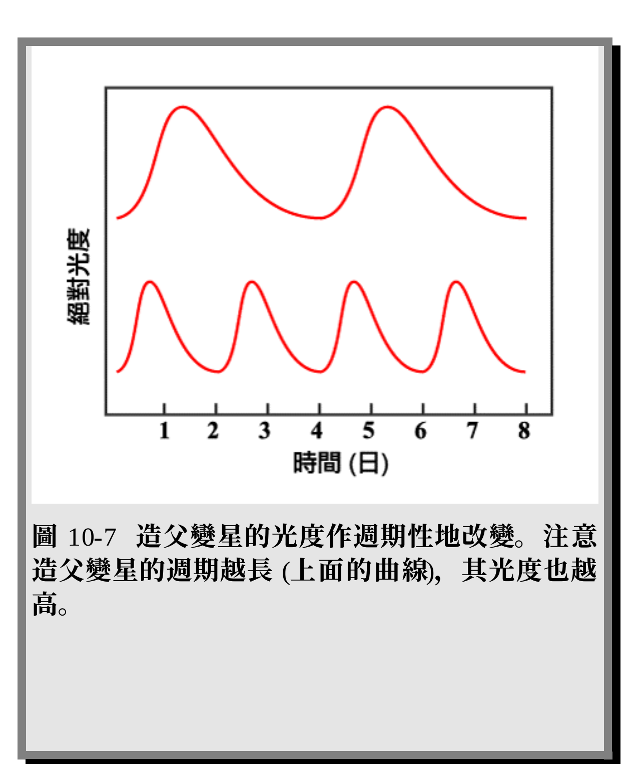


圖 10-7 造父變星的光度作週期性地改變。注意造父變星的週期越長 (上面的曲線)，其光度也越高。

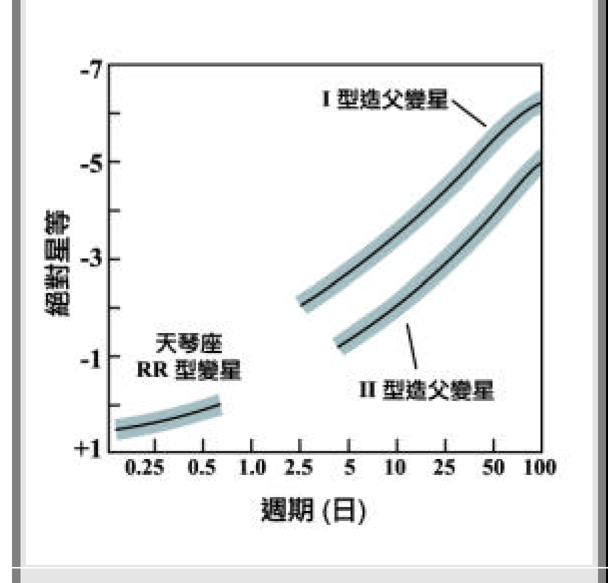


圖 10-8 造父變星的平均光度與週期的關係。造父變星的週期越長，其光度也越高。根據不同的週光關係，造父變星分為 I 型與 II 型。

10.4 星團

- **星團內的恆星由同一的星雲形成**
  - **它們的年齡相若，誕生時的化學成份也相似**
- **但恆星的光度 (質量) 與表面溫度 (顏色) 都不同**
  - **它們位於赫羅圖不同的位置**
- **質量較大的成員 (光度較強) 已離開主星序成為巨星，那些質量較小的成員仍然停留在主星序上，引證了質量較大的恆星停留在主星序上的時間較短的演化理論**
- **找出星團中剛離開主星序的恆星位置 – 轉折點** (turn-off point)**，可根據恆星演化理論，推斷星團的年齡** (**圖** 10-9)

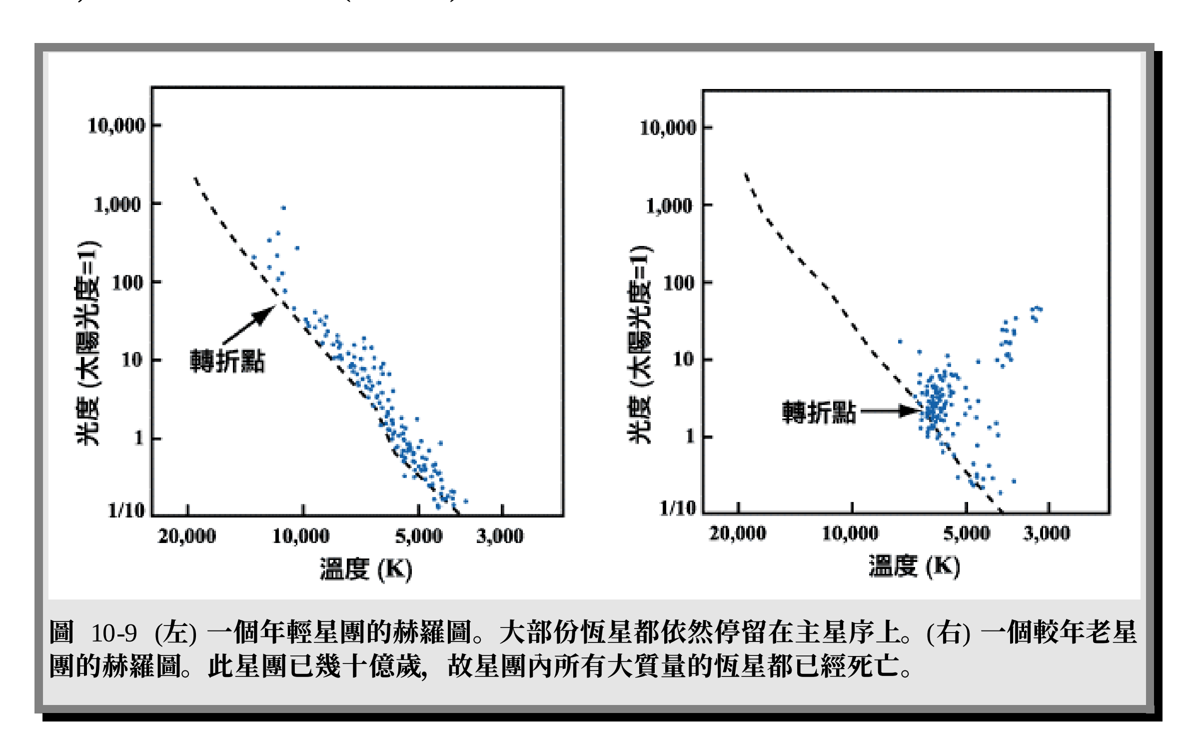


圖 10-9 (左) 一個年輕星團的赫羅圖。大部份恆星都依然停留在主星序上。(右) 一個較年老星團的赫羅圖。此星團已幾十億歲，故星團內所有大質量的恆星都已經死亡。

- **星團主要分為兩類：**
  - **疏散星團** (open cluster)**：由數十至數千顆恆星組成，恆星的密度較低，大部份疏散星團分佈在銀河平面附近**
  - **球狀星團** (globular cluster)**：由數十萬至數百萬顆年老** (~100-150 **億歲**) **的恆星組成，密集在一起呈球狀，大部份球狀星團分佈在銀河平面以上或以下的銀暈內**



圖 10-10 七姊妹星團 (M45)。我們單憑肉眼也能看見這個位於金牛座的疏散星團，星團內恆星被模糊的星雲包圍著，是星雲內塵埃反射星光造成的。

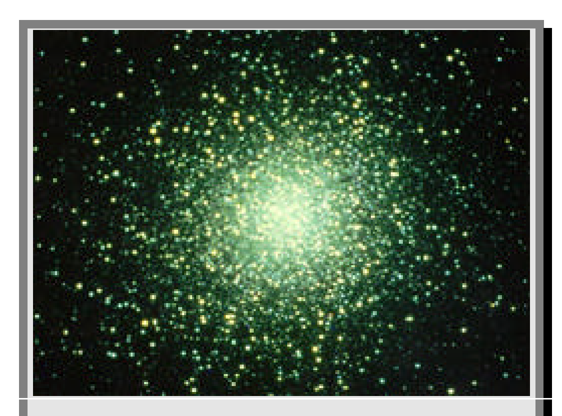


圖 10-11 位於武仙座的球狀星團 M13。它由大約一百萬顆恆星組成，密集在不足 80 光年直徑的區域內，年齡最少 100 億歲。